



DIGESTOR ANARÓBICO ENTERRADO ASISTIDO POR ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

Morales M.¹, Sosa M.² y Boucíguez A.³

^{1,3} Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de Salta
Av. Bolivia 5150, Salta, Argentina

correo-e: morales.martin.alberto@gmail.com

² GECCU, Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería.– Universidad Nacional de la Plata,
48 y 116, La Plata Argentina

RESUMEN

Un digestor anaeróbico es un módulo capaz de entregar una mezcla de gases como metano y dióxido de carbono llamado biogás. Este debe ser cargado con material orgánico que se degrada bajo condiciones de temperatura constante y en ausencia total de oxígeno. La aclimatación de un digestor anaeróbico requiere de temperaturas de entre 25° C y 45° C en el rango mesofílico.

En este trabajo se propone la incorporación de un colector solar con este fin. El colector solar no posee cubierta transparente y está construido casi en su mayoría con material plástico de PVC. Posee alta capacidad de acumulación y sus dimensiones son: 0,80 metros de ancho por 2,20 metros de largo. Este se integra a un digestor anaeróbico enterrado de 1000 litros de capacidad llenado en un 40% de su volumen. Se mantiene al digestor a una temperatura constante de 30° C por tanto se cuenta con un sistema de calefacción eléctrico capaz de asistir en los momentos en que no se cuenta con la radiación solar.

Con el sistema de calentamiento propuesto se logró lo cometido, la temperatura se mantuvo estable con pequeñas oscilaciones que el digestor en operación puede soportar sin interrupciones de la producción normal de biogás. La aplicación del colector depende mucho de las condiciones de radiación solar dada por el lugar en donde se encuentre instalado. En la Ciudad de Salta se logra una ventaja mayor que en otras regiones del país ya que posee un clima seco de alta radiación solar en la estación invernal. Se expone en este trabajo los resultados de las medidas de temperatura tomadas en el colector solar y el digestor anaeróbico. También se evalúa la curva de eficiencia del colector.

Palabras Claves: *digestor anaeróbico, colector solar, energía.*



1. INTRODUCCIÓN

La digestión anaeróbica es un proceso natural en el cual en ausencia de oxígeno un conjunto de bacterias entre ellas las metanogénicas convierten la materia orgánica en metano y otros gases. Se establece en un amplio rango de temperaturas, que van desde 0° a 97°C [1]. Sin embargo es deseable un valor elevado, dentro del rango mesófilo (25° C a 45° C) ya que disminuirá los tiempos de retención de la materia orgánica. El proceso se lleva a cabo en grandes contenedores llamados digestores anaeróbicos. Los hay de diferentes clases y formas. En estos debe mantenerse una temperatura constante cualquiera sea su valor [2], es una premisa si se desea obtener un mayor rendimiento. Una estrategia muy utilizada para disminuir las pérdidas de energía al entorno es enterrar al digestor. Con esto se logra también mantener una temperatura constante aunque, sin asistencia de energía alguna esta no alcanzará valores deseables para un rendimiento óptimo.

En América Latina en los últimos años se hizo popular el uso de digestores anaeróbicos de bajo costo de tipo tubular flexible [3]. Este tipo de digestores fueron desarrollados por Preston y otros [4]. Muchos sistemas simples de tratamiento son utilizados en el mundo, diseñados para uso doméstico. Más de 50 millones de estos sistemas son implementados en economías en desarrollo [5]. En algunos países de América Latina como México, Nicaragua, Colombia, Costa Rica [6] y Bolivia [7] tienen instalado esta tecnología de bajo costo y adaptados a regiones de clima frío utilizando calentamiento por energía solar [8].

En este trabajo se propone la construcción de un digestor anaeróbico enterrado con membrana flexible de PVC y cemento, esta membrana tiene la función de impermeabilizar al digestor haciéndolo apto para el contenido de materia orgánica y agua, mientras que el cemento ayuda a la sujeción de dicha membrana. Un invernadero recubre la parte superior del digestor. Se estudia la incorporación de un sistema de calentamiento automático compuesto por un colector solar plano y una resistencia eléctrica. El objetivo es mantener una temperatura constante con el sistema de calentamiento operando y sin asistencia humana. Con las medidas de temperatura e irradiancia solar se determina la curva de rendimiento del colector solar a fin de analizar el desempeño térmico del sistema solar. Durante la evaluación el digestor no se encuentra operando.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se construye el digestor anaeróbico con membrana de PVC. Una fosa de 1,50 m de profundidad por 0,90 m de ancho por 2,00 m de largo se recubre con material aislante y luego con la membrana plástica se logra su impermeabilización. El digestor está compuesto de una cámara central de 1000 litros y dos laterales de 200 litros. En estas se prepara la dilución correcta antes de ingresar al

www.icaife2018.com.ar



digestor y en la otra se recibe el material luego de degradarse. En la Figura 1 se aprecia al digestor abierto. En la misma imagen se observa al colector solar plano y en la imagen inferior el invernadero.



Figura 1. Imagen superior: digestor anaeróbico, cámaras laterales y el colector solar. Imagen inferior: invernadero

El colector solar está construido con membrana de PVC y no posee cubierta transparente. El invernadero consta de una estructura de hierro y encima de ella un policarbonato alveolar transparente de 4 mm de espesor.



Un sistema de calefacción apropiado permite mantener las condiciones adecuadas de temperatura dentro del digestor. Este debe ser robusto ya que permanecerá en funcionamiento por mucho tiempo y con cierta intermitencia.

A los fines de evaluar el sistema de calefacción compuesto por el sistema eléctrico más el solar se mide la temperatura en diversos puntos, tal como se señala en la Figura 2. En esta figura se esquematizan las partes del digestor y el sistema de calentamiento, en puntos rojos se representan los lugares donde se colocan los sensores de temperatura, numerados del 1 al 6, a saber:

- ✓ s_1 antes de ingresar al intercambiador de calor.
- ✓ s_2 a salir del intercambiador de calor.
- ✓ s_3 en el interior del digestor enterrado.
- ✓ s_4 en el aire.
- ✓ s_5 en el interior del colector solar plano.
- ✓ s_6 cubierta del digestor anaeróbico enterrado.

El calentamiento del digestor se produce por medio de dos elementos, el colector solar y una resistencia eléctrica, Figura 2. Para determinar cuál de ellas funcionará un termostato sensa constantemente la temperatura del colector solar. Si está por debajo de 30°C (el elegido en esta ocasión para el digestor anaeróbico) hace funcionar la resistencia eléctrica, o si por el contrario la temperatura del colector es suficiente, se activa la electrobomba de agua que hace circular el agua caliente. Otro termostato sensa la temperatura del digestor anaeróbico y si es necesario activa el funcionamiento del sistema de calefacción híbrido, es decir todo el sistema funcionará solamente si este termostato lo permite. En la Figura 2 se muestra en color rojo el conducto por donde circula el agua caliente y en color celeste el agua fría.

El aporte dado por la energía solar lo efectúa el colector solar plano y el invernadero colocado encima de la tapa del digestor. En la misma figura, en la parte inferior, se muestra una vista lateral del digestor y el invernadero. El circuito del fluido caloportador (agua destilada) se grafica en color celeste para representar el fluido frío que sale del intercambiador de calor y en color rojo el fluido caliente que proviene del colector solar o de la resistencia eléctrica. El intercambiador de calor se encuentra sumergido dentro del digestor.

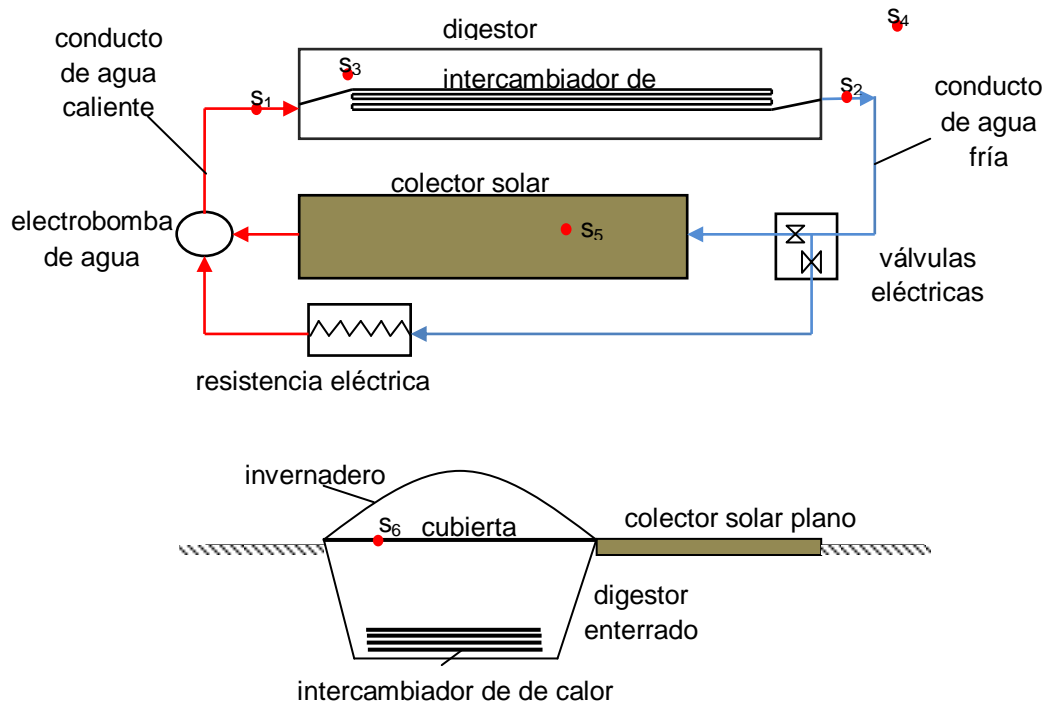


Figura 2. Esquema del sistema de calentamiento con sus componentes y ubicación de los sensores de temperatura.

Durante el mes de setiembre desde el día 19 al 26 periodo que se considera suficiente para lograr una temperatura constante. Se evalúa el comportamiento del sistema de calentamiento durante los 7 días de la experiencia con el sistema encendido. Se carga al digestor con 400 litros de agua y se comienza a medir a las 14 horas del día 19 del mes de setiembre. En el ensayo se mantiene al digestor en 30°C, si bien no es la temperatura óptima para la digestión anaeróbica, se pensó primero en evaluar el desempeño del colector solar, a los fines de estimar la temperatura máxima que alcanza. También se mide la irradiancia solar incidente sobre la superficie horizontal, un dato que resulta imprescindible para obtener la curva de rendimiento del colector solar plano.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los días en que se realiza la experiencia son cálidos con temperaturas máximas que superan en algunos casos los 30°C mientras que las mínimas se encuentran entre los 4 y 10°C. Sólo en el segundo día de la experiencia se registraron bajas temperaturas ambientales y niveles bajos de radiación. La Figura 3 muestra las temperaturas ambiente en color verde, en color rojo para la cubierta del digestor y la del colector en color azul.

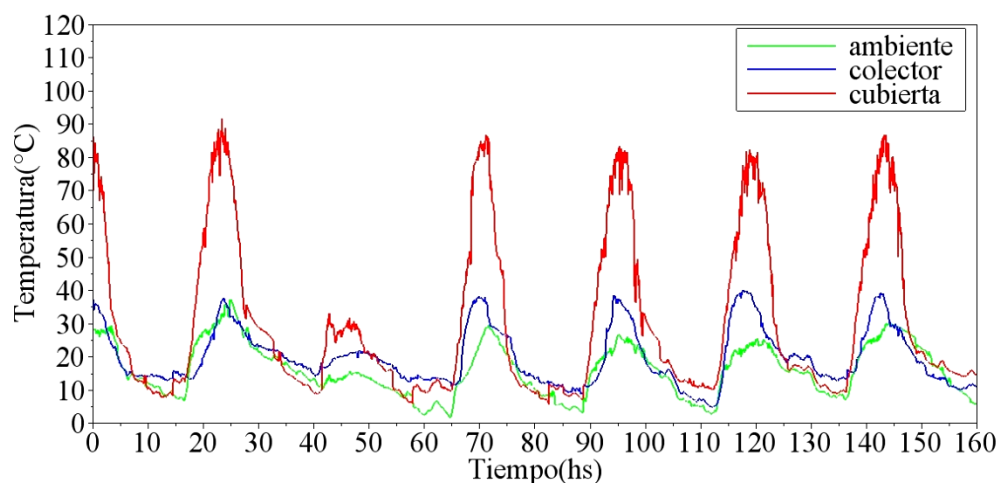


Figura 3. Temperaturas ambiente, del colector solar y la cubierta del digestor anaeróbico.

En la Figura 4 se muestran los datos de irradiancia solar directa sobre plano horizontal medidos en W/m^2 en los días en que evalúa el sistema de calentamiento para el digestor enterrado. Se destaca el día más frío con una radiación pico de 355 W/m^2 , se señala que es importante contar con días como este durante la evaluación en el rendimiento del colector solar. Los demás días son parecidos con una radiación máxima que alcanza los 700 W/m^2

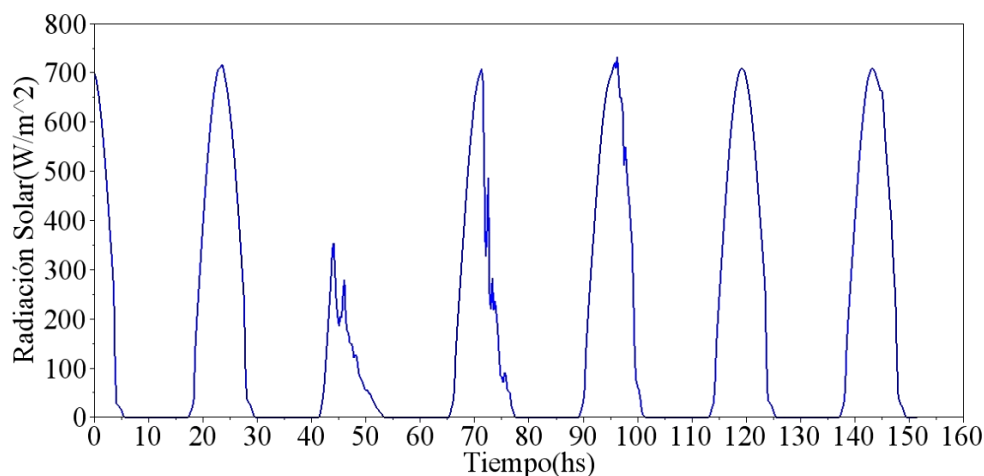


Figura 4. Irradiancia solar en W/m^2



Para evaluar cómo se comporta el intercambiador de calor que se encuentra sumergido en la carga del digestor se toman las temperaturas dentro del circuito del flujo caloportador, los sensores se ubican antes a la entrada y a la salida del intercambiador por fuera del digestor, como se señala en la Figura 2. En la Figura 5 se presentan las medidas de temperatura del caloportador antes y después de pasar por el intercambiador, llamados en la grafica como entrada y salida, en color rojo y azul respectivamente. Se destacan los sucesivos picos y valles en los casi 7 días de funcionamiento del sistema. Esta intermitencia está dada por los sucesivos encendidos y apagados de la bomba que establece un flujo de agua dentro de los conductos.

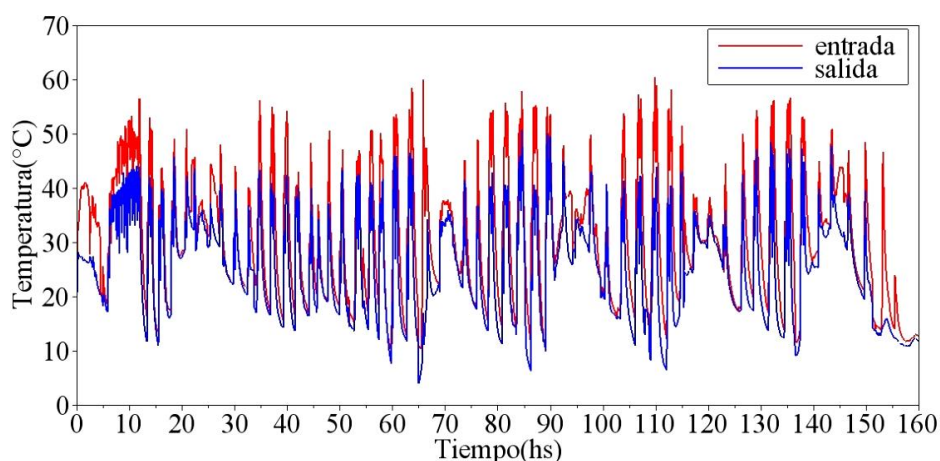


Figura 5. Medidas de temperatura a la entrada (rojo) y a la salida del intercambiador de calor (azul).

En general las curvas siguen el mismo patrón en los días cálidos, diferenciándose en el primer día, al inicio del ensayo y en el tercer día, que es el más frío. De la curva de color azul se observa que el flujo de agua sale del intercambiador con una temperatura más baja, con diferencias que van de 1°C a 7°C. De la curva en color rojo se observa que los máximos valores de temperatura se encuentran entre los 50 y 65 °C, estos se dan durante la noche, mientras que en las horas de radiación pico baja considerablemente para situarse entre los 30 y 40°C. Es en estas horas cuando se utiliza el colector solar, como se aprecia en la Figura 3 la temperatura del colector en los días soleados alcanza valores de entre 30 y 40 °C.

En la Figura 6 se presenta la temperatura del digestor anaeróbico enterrado durante las 180 horas de ensayo. Durante el primer día se requiere invertir la mayor cantidad de energía de toda la



actividad del digestor ya que la carga que inicialmente tiene una temperatura de 15°C debe escalar hasta los 30° C.

Como se observa en la Figura 6, este valor se alcanza luego de 11 horas para luego estabilizarse en torno a este valor. Durante este período se utiliza solo el sistema eléctrico. En el tiempo que permanece encendido el sistema de calentamiento la medida oscila alrededor de los 30°C, entre 29°C y 31°C, producto de los reiterados apagados y encendidos del sistema. Cabe aclarar que estas fluctuaciones de 1°C no representan un riesgo para el normal funcionamiento del digestor.

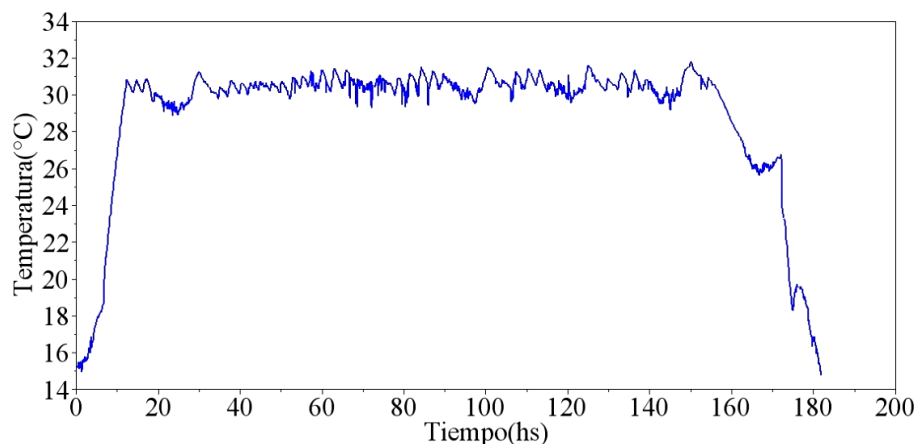


Figura 6. Temperatura del digestor anaeróbico.

2. 1. Curva de rendimiento del colector solar plano.

Con la determinación del rendimiento es posible calcular de acuerdo a las condiciones de radiación solar el área de colección necesaria para abastecer de cierta cantidad de energía calórica al digestor por esto resulta importante su determinación. Para su obtención se calcula el calor útil que es capaz de entregar a partir de la energía incidente en el colector. En estado estacionario el comportamiento de un colector solar esta descrito por un balance de energía entre la incidente y las pérdidas al entorno. La energía útil, es decir la real aprovechable:

Con la determinación del rendimiento es posible calcular de acuerdo a las condiciones de radiación solar el área de colección necesaria para abastecer de cierta cantidad de energía calórica al digestor por esto resulta importante su determinación. Para su obtención se calcula el calor útil que



es capaz de entregar a partir de la energía incidente en el colector. En estado estacionario el comportamiento de un colector solar esta descrito por un balance de energía entre la incidente y las pérdidas al entorno. La energía útil, es decir la real aprovechable, ecuación (1):

$$\dot{Q}_u = A_c F_R [(\tau\alpha) G_T - U_L (T_i - T_a)] \quad (1)$$

Siendo A_c el área del colector. G_T es la radiación solar incidente. $\tau\alpha$ es el producto de el coeficiente de transmisión y el de absorción de la cubierta transparente y de la placa absorbadora del colector respectivamente. F_R es equivalente a la efectividad de un intercambiador de calor convencional. La energía perdida por conducción, convección y radiación infrarroja se representa por el coeficiente U_L . T_i y T_a son las temperaturas del fluido que ingresa al colector y la ambiente, [9]. El rendimiento instantáneo del colector solar se calcula tomando el cociente entre la energía útil aprovechable \dot{Q}_u y la incidente sobre el plano del colector de área A_c , ecuación (2).

$$\eta_i = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G_T} = \frac{A_c F_R [(\tau\alpha) G_T - U_L (T_i - T_a)]}{A_c G_T} = F_R (\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{G_T} \quad (2)$$

$F_R(\tau\alpha)$ y $F_R U_L$ son dos parámetros que describen como trabaja el colector solar, el primero es un indicador de cómo se absorbe la energía mientras que el segundo indica como la energía se pierde. La curva del rendimiento es una recta de pendiente negativa dada por el par de valores $(\eta_i, T_i - T_a / G_T)$ donde T_a es la temperatura ambiente. La pendiente de la curva está dada por el producto de F_R denominado factor de remoción y U_L el coeficiente global de perdida. En la intersección de la recta y el eje de las abscisas se encuentra el valor de $F_R (\tau\alpha)$ que es el producto entre el factor de remoción y los factores de transmisión y absorción de radiación τ y α respectivamente. De los cálculos se obtiene una ordenada de 0,63 y una pendiente negativa de 16,27 W/m²°C, los que se presentan en la ecuación 3

$$\eta_i = 0,63 - 16,27 \text{ W/m}^2\text{°C} \frac{(T_i - T_a)}{G_T} \quad (3)$$



Las curvas de eficiencia de los colectores solares planos sin cubierta transparente poseen una ordenada al origen de alrededor de 0,75 y una pendiente negativa de aproximadamente $17 \text{ W/m}^2\text{°C}$ [9]. El colector solar propuesto posee una gran masa térmica. Así el factor $FR(\tau\alpha)$ de 0,63 resulta pequeño.

3. CONCLUSIONES

Con el sistema de calentamiento propuesto se logró lo cometido, la temperatura se mantuvo estable con pequeñas oscilaciones que el digestor en operación puede soportar sin interrupciones de la producción normal de biogás. También, el sistema se mantuvo en funcionamiento con un control rutinario sin ninguna intervención.

El colector solar está enteramente compuesto de material plástico y no posee cubierta transparente por esta razón las temperaturas de salida del agua no superan los 40°C durante los ensayos. Por lo tanto con este tipo de colector la temperatura de operación del digestor debe estar por debajo de este valor.

Se logra una contribución de la energía solar térmica para calefaccionar el digestor que resulta positiva. La aplicación del colector depende mucho de las condiciones de radiación solar dada por el lugar en donde se encuentre instalado. En la Ciudad de Salta se logra una ventaja mayor que en otras regiones del país ya que posee un clima seco de alta radiación solar en la estación invernal.

El digestor enterrado posee la ventaja de aminorar las pérdidas de calor a su entorno, lo que se traduce en menos energía invertida diariamente para su calefacción. Sin embargo será necesario evaluar su rendimiento en base a la cantidad de biogás que produzca.

4. REFERENCIAS

- [1] Muñoz Valero, J.A., Ortiz Cañavate, J., Vázquez Minguela, J. *Técnica y aplicaciones agrícolas de la biometanización*. Serie Técnica- Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid, 1987.
- [2] Verma S., *Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid waste*. Thesis for Master Sciences. Columbia University. USA, 2002.
- [3] Marti-Herrero J., Alvarez R. *Improvement through low cost biofilm carrier in anaerobic tubular digestion in cold climates regions*. Bioresource Technology 167, p 87-93, 2014.

www.vicaim2018.com.ar



- [4] Botero R.B. and Preston T.R., *Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas: Manual para su instalación, operación y utilización*. Cali, Colombia: CIPAV 1987, p 20, 1987.
- [5] Bui Xuan An, Ngo Van Man, Duong Nguyen Duc Anh, Preston T.R. , *Installation and performance of low cost polyethylene tube biodigester on small scale farms in Vietnam*. In: Proc National seminar-workshop in sustainable livestock prod on local feed resources agric. Pub house Ho Chi Minh, pp 95-103. 1994.
- [6] Ghimire P.C. *SNV supported domestic biogas programs in Asia and Africa*. Renewable Energy 49, p 90-94, 2013.
- [7] Chen L., Zhao L., Ren C., Wang F. 2012. *The progress and prospect of rural biogas production in China*. Energy policy 51, 58-63, 1994.
- [8] Lansing S., Botero R. *Waste treatment and biogas quality in small-scale agriculture digesters*. Bioresour. Technol 99, p 5881-5890, 2013.
- [9] Duffie J. *Solar engineering of thermal processes*. Third Edition. Interscience Publications, USA, 2006.